

**АГРОІНЖЕНЕРІЯ**

УДК 631.362

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.3-14>**Б.І. Котов**, проф., д-р. техн. наук*Подільський державний аграрно-технічний університет (ПДАТУ), м. Кам'янець-Подільський, Україна***Р.А. Калініченко**, доц., канд. техн. наук*ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут», м. Ніжин, Україна***Ю.І. Панцир**, доц., канд. техн. наук*Подільський державний аграрно-технічний університет (ПДАТУ), м. Кам'янець-Подільський, Україна***І.Д. Герасимчук**, доц., канд. техн. наук*Подільський державний аграрно-технічний університет (ПДАТУ), м. Кам'янець-Подільський, Україна***В.О. Грищенко**, канд. техн. наук*Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна**e-mail: bepeck2001@rambler.ru*

## Математична модель теплонасосної системи охолодження матеріалу після сушіння і термообробки

В статті розглядається питання підвищення ефективності функціонування охолоджувачів нагрітого в процесі сушіння матеріалу шляхом використання теплонасосної установки для вироблення штучного холоду. Запропоновано схему використання теплового насосу в комплексі із сушильною установкою і виносним охолоджувачем матеріалу. Сформульовано математичний опис стаціонарних режимів функціонування сушильної установки, охолоджувача матеріалу та елементів теплового насосу на основі парокомпресорної холодильної установки.

**сушильна установка, охолоджувач матеріалу, тепловий насос, компресор, конденсатор, повітроохолоджувач**

**Постановка проблеми.** Охолодження зернового матеріалу після теплового сушіння є обов'язковою операцією, так як за нормативними вимогами [1] зерно після висушування в зерносушарках повинно мати температуру на 5...10 °С більшу за температуру оточуючого повітря (середовища). Практика експлуатації сушильних установок, в яких використовують охолоджувальні шахти з коробами для розподілу охолоджуючого повітря, показує, що вони не забезпечують належного охолодження зерна. В колонкових сушарках зона охолодження, як правило, є продовженням сушильного тракту, а товща шару збільшена, тому ефективність охолодження нижча чим в шахтних сушарках. Більш перспективними є виносні охолоджувачі зерна з вібросрідженим або пневмосрідженим рухомим шаром зернового матеріалу. Але за обмеження швидкості фільтрації повітря крізь шар охолоджуємого зерна (для попередження виносу зерна) збільшується час охолодження і габарити установок.

Причиною низької ефективності функціонування охолоджувачів зерна існуючих типів є відносно висока температура охолоджуючого повітря (атмосферне повітря 15...25 °С, а в збиральний період до 30 °С). Радикальним способом підвищення ефективності охолоджуючих систем є застосування штучного машинного охолодження повітря.

Перспективним напрямком холодильної підготовки повітря в установках для охолодження зерна є використання теплових насосів (ТН). Основні переваги застосування ТН для охолодження повітря, це використання як джерела енергії теплоти нагрітого зерна та отримання до 4 кВт·год енергії на вироблення холоду на кожному затрачену 1 кВт·год електроенергії. Крім того ця ж енергія використовується і для нагрівання сушильного агенту. Особливо слід відмітити необхідність застосування штучного холоду для охолодження зерна після мікронізації, коли його температура на виході мікронізатора досягає 80...90 °С.

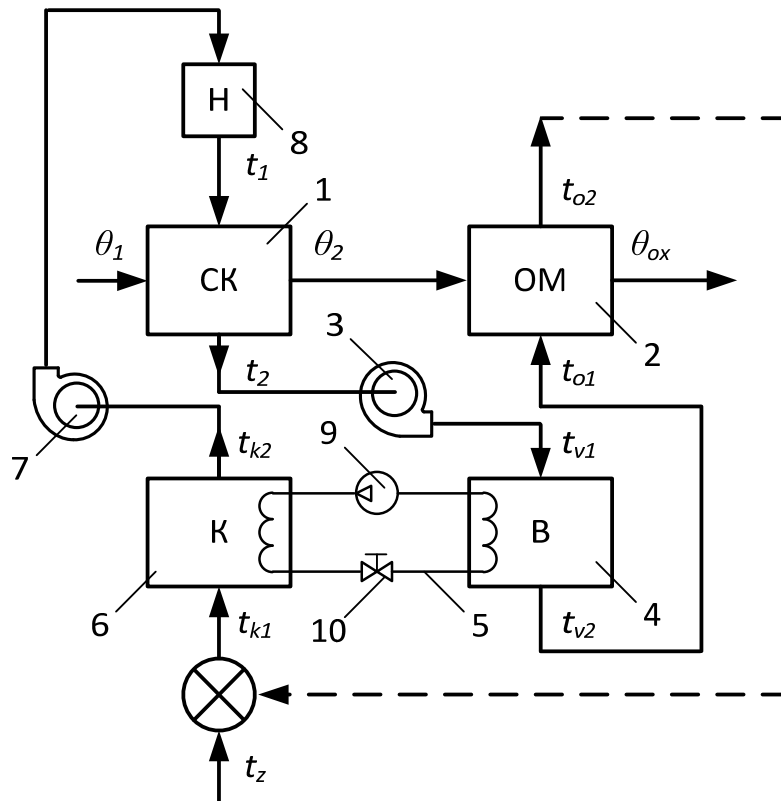
Для виявлення резервів підвищення ефективності установок для охолодження зернових матеріалів після сушіння і високотемпературної обробки необхідно проаналізувати роботу охолоджувача зерна сумісно з теплонасосною системою підготовки охолоджуючого повітря.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз відомих способів та технік охолодження зернового матеріалу наведено в роботі [2]. Математичні моделі для розрахунків процесу охолодження зерна в різному стані зернового шару наведено в роботах [3-6]. Охолодження зерна у щільному рухомому шарі [3] у вібропневмовідцентровому шарі [4], у нерухомому шарі при перехресному русі зерна і охолоджуючого повітря [5], у висхідному пульсуючому потоці повітря [6], у вихровому повітряному потоці [7]. В роботі [8] запропоновано і обґрунтовано доцільність використання штучного охолодження повітря для охолодження зерна. В роботі [9] висвітлено математичне моделювання режиму повітроохолоджувача в складі холодильної машини, що використовується для охолодження зерна. В роботі [10] наведено схему сушильної установки з теплонасосною системою охолодження зерна; запропоновано методи оптимального проектування теплонасосних сушильних установок різного призначення. Але, що до математичного опису роботи зерноохолоджуючої системи з тепловим насосом або холодильною установкою, то такі дані висвітлено недостатньо.

**Постановка завдання.** Сформулювати математичний опис теплового режиму сумісного функціонування охолоджувача зернового матеріалу після термообробки (сушіння) та теплонасосної парокомпресорної установки.

**Матеріали і методи досліджень.** Як приклад виробничої реалізації використовується схема енерготехнологічного процесу сушильної установки з виносним охолоджувачем обладнаної ТН на базі парокомпресорної установки (рис. 1). Функціонування теплонасосної системи охолодження матеріалу, який виходить із сушарки відбувається так: відпрацьований сушильний агент із камери сушіння (1) вентилятором (3) подається в повітряно-рідинний теплообмінник (4) випарника ТН, де передає теплоту нагрітого повітря і водяної пари холодоагенту (в контурі циркуляції холодоагенту). Зневоднене (шляхом конденсації) і охолоджене повітря подається в охолоджувач матеріалу (2), де відбирає теплоту матеріалу, знижуючи його температуру. В залежності від заданого режиму охолодження, повітря відпрацьоване при охолодженні матеріалу з температурою не меншою 25 °С може подаватися в теплообмінник конденсатора (6) і при його нагріванні використовуватись як сушильний агент. В звичайному режимі теплообмінник конденсатора (повітряно-рідинний) (6) використовується для нагрівання сушильного агенту (зовнішнього повітря), яке

вентилятором (7) подається в сушильну камеру (1). При необхідності додаткового підігріву сушильного агента використовують паровий, або електричний калорифер (8).



1 – сушильна камера; 2 – охолоджувач зерна; 3, 7 – вентилятори; 4 – випарник;  
5 – контур циркуляції холодоагенту; 6 – конденсатор; 8 – повітрянагрівач;  
9 – компресор; 10 – дроселюючий вентиль

Рисунок 1 – Схема сушильної установки із теплонасосною системою охолодження матеріалу після сушки  
Джерело: [10]

В основі формування математичного опису досліджуваного об'єкта лежать рівняння теплового балансу, сушильної камери, охолоджувача матеріалу і основних інерційних елементів теплонасосної установки (випарника і конденсатора). Оскільки математична модель створюється для теплоенергетичного аналізу системи утилізації теплових викидів сушарки, змінними параметрами елементів системи можна вважати їх значення на виході кожного елемента, а саме – параметри повітря на виході охолоджувача і сушильного агента на виході сушильної камери, а також параметри повітря і холодоагенту на виході теплообмінників конденсатора і випарника. Параметри теплоносіїв і холодоагентів на вході в робочі елементи вважаються заданими.

Оскільки розглядаємо теплові процеси в безперервно діючих сушильних установках, то доцільно складати математичний опис для стаціонарного режиму функціонування сушильної установки і охолоджувача матеріалу. З врахуванням, що теплова інерційність парокомпресорної установки на декілька порядків менша від сушарки і охолоджувача, параметри ТН визначаються також як для стаціонарного режиму.

Фізико-математичним обґрунтуванням моделі тепло- і масообміну в процесі сушіння і охолодження матеріалу (зернового) є наступні умови спрощуючи математичний опис, але не змінюючи реальний процес:

- волога із матеріалу видаляється за законом випарування Дальтона, при цьому волога в матеріалі випаровується і видаляється одночасно; вологовміст і температура в об'ємі матеріалу розподілені рівномірно, тепло і масообмін відбувається тільки між поверхнею матеріалу і сушильним агентом; ефекти випромінювання і контактної теплопередачі враховуються коефіцієнтами теплообміну; стаціонарні поля температур і вологовмісту приймаються одномірними, які змінюються за координатою  $y$ , що відраховується в напрямку руху матеріалу;

- при охолодженні матеріалу видалення вологи не враховується за малосності залишкової вологи;

- величина поверхні матеріалу в процесі сушіння і охолодження не змінюється;

- теплообмінне обладнання теплового насосу є об'єктом із зосередженими параметрами (температура трубчастої частини контуру циркуляції холодоагенту за координатою руху холодоагенту не розподілена (температура трубки у конденсаторі дорівнює температурі конденсації, а у випарнику – температурі кипіння холодоагенту)).

**Результати досліджень.** Стаціонарний тепловий режим сушильної установки за прийнятою схемою [11] і зробленими припущеннями можна описати наступною системою диференціальних рівнянь:

$$G_m c_m L \frac{d\theta}{dy} = \alpha f (t - \theta) + G_o r \frac{du}{dy} L, \quad (1)$$

$$G_c c_p L \frac{dt}{dy} = \alpha f (\theta - t) + r G_c L \frac{dd}{dy}, \quad (2)$$

$$-G_o \frac{du}{dy} L = \beta f (P_n(\theta) - P(d)), \quad (3)$$

$$G_c L \frac{dd}{dy} = \beta f (P_n(\theta) - P(d)), \quad (4)$$

де  $P_n(\theta) = a\theta + c$  – парціальний тиск насиченої пари при температурі матеріалу;

$P(d) = bd$  – парціальний тиск пари в повітрі;

$G_m, G_c$  – масові витрати матеріалу і сушильного агента;

$c_m, c_p$  – питома теплоємність матеріалу і газу;

$r$  – питома теплота випарювання;

$\alpha, \beta$  – коефіцієнти теплообміну і масообміну;

$L$  – довжина транспорту матеріалу;

$G_o$  – масові витрати абсолютно сухого матеріалу;

$y$  – координата в напрямку руху потоків матеріалу і сушильного агента;

$\theta, t$  – температура матеріалу і сушильного агента;

$u, d$  – вологовміст матеріалу і сушильного агента;

(1, 2) – позначення параметра на вході і виході сушарки;

$f$  – поверхня матеріалу.

Стаціонарний режим охолодження матеріалу при проточному русі можна описати системою диференціальних рівнянь в такому вигляді:

$$G_{m0}c_{m0}d\theta = \frac{\alpha f}{L}(t_0 - \theta)dy, \quad (5)$$

$$G_{v0}c_p dt_0 = \frac{\alpha f}{L}(\theta - t_0)dy, \quad (6)$$

де  $G_{m0}, G_{v0}$  – витрати (масові) висушеного матеріалу і охолоджуваного повітря;  
 $c_{m0}$  – теплоємність висушеного матеріалу;  
 $t_0$  – температура охолоджуючого повітря.

Розв'язок системи рівнянь (5) – (6) при граничних умовах:  $y = 0; t = t_1; \theta = \theta_2$ ; отримано у вигляді:

$$t(y) = t_{01} + \frac{k_1}{k} \Delta T (1 - e^{-ky}); \quad (7)$$

$$\theta(y) = \theta_2 + \frac{k_2}{k} \Delta T (1 - e^{-ky}); \quad (8)$$

$$\text{де } k_1 = \frac{\alpha f}{G_{v0}c_p L}; k_2 = \frac{\alpha f}{G_{m0}c_{m0} L}; k = k_1 + k_2; \Delta T = (\theta_2 - t_{01}).$$

Значення температури повітря  $t_{02}$  та матеріалу  $\theta_{0x}$  на виході охолоджувача визначається підстановкою  $y = L$ .

Таким чином вихідні параметри повітря і матеріалу на виході із повітроохолоджувача визначатимуться:

$$t_{02} = t_{01} + \frac{k_1}{k} \Delta T \left( 1 - e^{-\frac{\alpha f}{G_{v0}c_p L}} \right), \quad (9)$$

$$\theta_{0x} = \theta_2 + \frac{k_2}{k} \Delta T \left( 1 - e^{-\frac{\alpha f}{G_{m0}c_{m0} L}} \right). \quad (10)$$

Параметри відпрацьованого сушильного агенту і висушеного матеріалу визначаються розв'язанням системи рівнянь (1) – (4):  $t(y); d(y); \theta(y); u(y)$ . Для розв'язку системи рівнянь (1) – (4) використаємо критерій Ребіндера  $Rb = \frac{c_m d \theta}{r du}$  [11],

та його аналог для сушильного агенту  $Rb' = \frac{c_p dt}{r dd}$ , який характеризує відношення явної теплоти, до скритої, яку сушильний агент передає матеріалу в процесі теплообміну («мокрый» теплообмін).

В рівняннях (1) і (2) зробимо заміни:  $-\frac{du}{dy} = \frac{c_m}{r Rb} \frac{d\theta}{dy}$ ;  $\frac{dd}{dy} = -\frac{c_p}{r Rb} \frac{dt}{dy}$ , і перепишемо рівняння (1) і (2) у вигляді:

$$c'_m L \frac{d\theta}{dy} \alpha f (t - \theta); \quad (11)$$

$$-c'_p L \frac{dt}{dy} = \alpha f(t - \theta). \quad (12)$$

Розв'язок системи рівнянь за граничною умовою:  $y = 0$ ;  $\theta = t_1$ ;  $t = t_1$ , отримано у вигляді:

$$t(y) = t_1 - \frac{k_1}{k} \Delta T_1 (1 - e^{-ky}), \quad (13)$$

$$\theta(y) = \theta_1 + \frac{k_2}{k} \Delta T_1 (1 - e^{-ky}), \quad (14)$$

$$\text{де } k_1 = \frac{\alpha f}{c'_m L}; k_2 = \frac{\alpha f}{c'_p L}; k = k_1 + k_2; c'_m = c_m \left( G_m + \frac{G_o}{Rb} \right);$$

$$c'_p = c_p G_v \left( 1 + \frac{1}{Rb} \right); \Delta T_1 = t_1 - \theta_1.$$

Підставляючи значення  $\theta(y)$  в рівняння (4) і розкриваючи залежності  $P_n(\theta)$ ,  $P(d)$  отримаємо:

$$\frac{dd}{dy} + Ad = B_1 - B_2 e^{-ky}, \quad (15)$$

$$\text{де } A = \frac{\beta f b}{G_c L}; B_1 = \frac{\beta f}{G_c L} \left( c + a \theta_0 + \frac{k_1}{k} \Delta T_1 \right); B_2 = \frac{a \beta f}{G_c L} \frac{k_1}{k} \Delta T_1.$$

Розв'язок рівняння (15) за умови:  $y = 0$ ;  $d = d_1$ , має вигляд:

$$d(y) = \left( d_1 - \frac{B_1}{A} + \frac{B_2}{A-k} \right) e^{-Ay} + \frac{B_1}{A} - \frac{B_2}{A-k} e^{-ky}. \quad (16)$$

Зміну вологовмісту матеріалу за координатою  $u(y)$  отримаємо з рівняння матеріального балансу:

$$-G_o du = G_c dd. \quad (17)$$

Інтегруючи (17) матимемо:

$$G_o(u_1 - u) = G_c(d - d_1). \quad (18)$$

звідки:

$$u(y) = u_1 + \frac{G_c}{G_o} d_1 - \frac{G_c}{G_o} d(y), \quad (19)$$

Підставляючи значення  $d(y)$  із (16) в (13) після перетворень отримаємо:

$$u(y) = u_1 + \frac{G_c}{G_o} d_1 - \frac{G_c}{G_o} \left( \left( d_1 - \frac{B_1}{A} + \frac{B_2}{A-k} \right) e^{-Ay} + \frac{B_1}{A} - \frac{B_2}{A-k} e^{-ky} \right). \quad (20)$$

Значення параметрів матеріалу та сушильного агента на виході сушарки:  $\theta_2$ ,  $u_2$ ,  $t_2$ ,  $d_2$ , визначаються підстановкою  $y = L$  в рівняння (13, 14, 16, 20), де  $L$  – довжина транспортуючої системи сушарки (стрічка, вібрлоток).

Кількість вологи, що конденсується на поверхнях повітряного теплообмінника випарника,  $W$  зневоднюючи відпрацьований сушильний агент можна визначити з рівняння матеріального балансу для випарника:

$$W = G_c(d_2 - d_{dv}) = \sigma_k \beta \left( d_n(\bar{\theta}_v) - \frac{\bar{d}_2 + d_{2v}}{2} \right). \quad (21)$$

Для парокомпресорної теплонасосної установки, яка функціонує у встановленому режимі взаємозв'язки між параметрами теплообмінників конденсатора і випарника визначаються рівняннями балансу теплової енергії [12, 13]:

– для контуру випарника

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_o = G_v c_p \xi (t_{v1} - t_{v2}), \\ Q_o = k_o F_o \Delta T_v, \\ \Delta T = (t_{v1} - t_{v2}) \left( \ln \frac{t_{v1} - t_{v2}}{t_{v2} - t_o} \right)^{-1}. \end{array} \right. \quad (22)$$

– для конденсатора

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_k = G_k c_p (t_{k2} - t_{k1}), \\ Q_k = k_k F_k \Delta T_k, \\ \Delta T_k = (t_{k2} - t_{k1}) \left( \ln \frac{t_{k2} - t_{k1}}{t_k - t_{k1}} \right)^{-1}. \end{array} \right. \quad (23)$$

Рівняння енергетичного балансу теплонасосної установки:

$$Q_k = Q_o + N_k. \quad (24)$$

В рівняння (22) – (24) позначено:  $Q_o, Q_k$  – теплова потужність випарника та конденсатора;  $N_k$  – потужність компресора;  $G_v, G_k$  – масові витрати повітря у випарнику та конденсаторі;  $c_p$  – питома теплоємність повітря (вологого);  $t_{v1}, t_{k1}$  – температура повітря на вході у випарник і конденсатор;  $t_o, t_k$  – температура кипіння і конденсації холодоагенту;  $k_o, k_k$  – коефіцієнт теплопередачі від холодоагенту до повітря у випарнику і конденсаторі;  $F_o, F_k$  – поверхня теплообміну випарника і конденсатора;  $\xi$  – коефіцієнт вологовипадіння;  $\Delta T_o, \Delta T_k$  – середньологарифмічна різниця температури повітря і холодоагенту у випарнику і конденсаторі.

З розв'язків системи рівнянь (17) і (18) визначені параметри охолоджуючого повітря на виході випарника:

$$t_{v2} = t_o + (t_{v1} - t_o) e^{-\frac{k_o F_o}{G_v c_p \xi}}, \quad (25)$$

та сушильного агента на виході конденсатора:

$$t_{k2} = t_k - (t_k - t_{k1}) e^{-\frac{k_k F_k}{G_c c_p}}. \quad (26)$$

Для замикання отриманої системи рівнянь (9 – 10), (13 – 14, 16), (25 – 26) треба мати рівняння зв'язку між елементами теплонасосної системи тепло-холодопостачання та сушильної установки. Відповідно до розрахункової схеми (рис. 1) матимемо:

$$t_2 = t_{v1}; t_{o1} = t_{v2}; t_{v2} = t_{o2}; t_1 = t_{k2}; t_{k1} = t_z = t_{o2}. \quad (26)$$

Підставляючи значення параметрів (26) у відповідні рівняння, що визначають вихідні параметри сушильної установки і охолоджувача, отримуємо замкнуту математичну модель теплонасосної системи холодо- і тепло постачання сушильної установки із охолоджувачем матеріалу:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{v1} = t_{k2} - \frac{k_1}{k} \Delta T_1 \left( 1 - e^{-\alpha f \left( \frac{1}{c'_m} + \frac{1}{c'_p} \right)} \right) \\ d_{v1} = \left( d_1 - \frac{B_1}{A} + \frac{B_2}{A-k} \right) e^{-\frac{\beta f b}{G_c}} + \frac{B_1}{A} - \frac{B_2}{A-k} e^{-\alpha f \left( \frac{1}{c'_m} + \frac{1}{c'_p} \right)} \\ t_{o2} = t_{v2} + \frac{k'_1}{k} \Delta T_o \left( 1 - e^{-\frac{\alpha f}{G_{vo} c_p}} \right) \\ t_{v2} = t_o + (t_{v1} - t_o) e^{-\frac{k_o F_o}{G_{vo} c_p \xi}} \\ t_{k2} = t_k - (t_k - t_{k1}) e^{-\frac{k_k F_k}{G_c c_p}} \\ d_{v2} = d_{v1} - \sigma_k F_o (d_n(t_o) - \bar{d}_v) \end{array} \right.$$

де  $\sigma_k$  – коефіцієнт масообміну при конденсації;

$d_n$  – вологовміст насиченого повітря при температурі  $t_o$ .

Величини температури кипіння і конденсації орієнтовно приймаються за даними експериментів [14]:  $t_o = 10$  °С;  $t_k = 70...80$  °С. В подальшому уточнюються розрахунками за методами [13] в залежності від визначеної температури охолодженого зерна, яка залежить від зовнішньої температури:  $\theta_{3k} = t_z + (5...10^\circ\text{C})$  [1]. При заданих параметрах  $t_k$  та  $t_o$ , коефіцієнт перетворення ТНУ дорівнює 3.0.

На рисунках 2 і 3 наведено зміну параметрів процесів сушіння і охолодження (їх розподіл) в напрямку переміщення: при звичайному сушильному циклі та при охолодженні атмосферним повітрям і штучно охолодженим. З аналізу графіків випливає, що застосування ТН для охолодження дозволяє знизити температуру матеріалу на 5 °С, і використати відпрацьоване повітря (25 °С) для підігріву сушильного агенту.



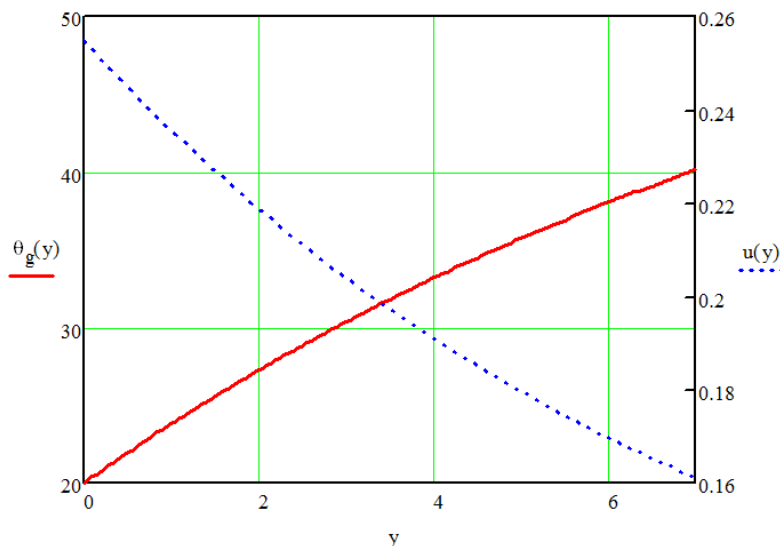
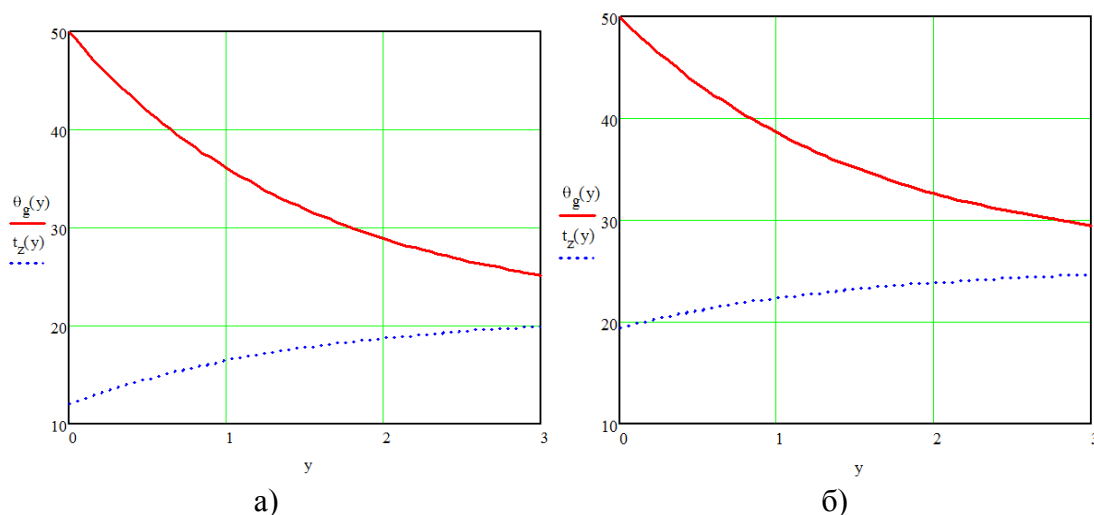


Рисунок 2 – Зміна температури та вологовмісту зерна за координатою сушарки

Джерело: розроблено авторами



а) із використанням теплового насоса; б) атмосферним повітрям

Рисунок 3 – Зміна температури зерна та охолоджуючого повітря за координатою охолоджувача

Джерело: розроблено авторами

### Висновки:

1. Сформульована математична модель стаціонарних режимів теплонасосного сушильного агрегату із штучним охолодженням висушеного матеріалу, може використовуватись для оцінки доцільності та енергетичної ефективності використаних холодильних машин для охолодження зерна особливо після високотемпературної обробки.

2. Отримані аналітичні залежності у вигляді замкненої системи рівнянь можна використовувати для оптимізації параметрів теплонасосної сушильної установки за критерієм мінімізації енергоспоживання.

## Список літератури

1. Інструкція по сушке продовольственного, кормового зерна, семян масличных культур и эксплуатации зерносушилок / Г.Н. Станкевич и др. Одеса: “АРД-ЛТД”, 1997. 72 с.
2. Курганський О.Д., Котов Б.І. Аналіз способів охолодження зернового матеріалу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2016. № 2(94). С. 49– 52.
3. Котов Б.І., Калініченко Р.А., Курганський О.Д. Тепло і масообмін при сушінні і охолодженні зернового матеріалу у щільному рухомому шарі . *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017. № 1. С. 93–95.
4. Теоретичні дослідження процесу охолодження зернового матеріалу при переміщенні у вібровідцентровому шарі / Б.І. Котов, Р.А. Калініченко, О.Д. Курганський, С.П. Степаненко, В.О. Швидя. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2016. Вип. 46. С. 54-60.
5. Калініченко Р.А., Котов, Б.І. Математичне моделювання стаціонарних режимів установок для охолодження і нагріву дисперсних сільськогосподарських матеріалів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2018. Вип. 8. С. 97– 104.
6. Визначення шляхів підвищення ефективності охолодження зерна після сушарок і термообробок / Б.І. Котов, Р.А. Калініченко, А.В. Рудь, С.М. Грушецький . *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 2(13). С.111– 120.
7. Алтухова Т.А., Шуханов, С.Н. Экспериментальные исследования работы вихревого охладителя зерна с помощью полнофакторного эксперимента . *Вестник АлтГАУ*. 2013. № 9. С.99– 102.
8. Станкевич Г.Н., Петруня, В.Н. Техника и технология использования искусственно охлажденного воздуха в процессе хранения зерна . *Хранение и переработка зерна*. 2003. №3. С.52–53.
9. Грищенко В.О., Котов Б.І. Математичне моделювання і розрахунок динамічних режимів повітроохолоджувача для охолодження зерна та зберігання. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. 2016. Вип. 252. С. 108–114.
10. Чайченец Н.С. Оптимальное проектирование теплонасосных сушильных установок . *Холодильная техника*. 1989. № 2. С.46–50.
11. Котов Б.І., Калініченко Р.А., Ліпунов М.І. Аналітичне визначення динамічних тепловологісних режимів зерносушарок безперервної дії . *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2012. Вип. 42, ч. 2. С.17–23.
12. Амерханов Р.А. Оптимизация сельскохозяйственных энергетических установок с использованием возобновляемых видов энергии. Москва: Колос, 2003. 532 с.
13. Нікульшин, В.Р., Височин, В.В. Теплові насоси та кондиціонери : навч. посіб. О. : Медіа Арт, 2014. 180 с.
14. Хоштария А.Г. Разработка и экспериментальное изучение процесса теплонасосного теплоснабжения чаефиксационных и чаесушильных агрегатов и теплотехническое исследование низкотемпературного хранения чайного листа : Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.14.04. Груз. политехн. ин-т. Тб., 1973. 25 с.

## References

1. Stankevich, G.N., Shapovalenko, O.I., Strahova, T.V., Petrunja, B.M., Jakovenko, A.I. & Ostapchuk, M.V. et al. (1997). *Instrukcija po sushke prodovol'stvennogo, kormovogo zerna, semjan maslichnyh kul'tur i jekspluatacii zernosushilok* [Instructions for drying food, feed grains, oilseeds and operation of grain dryers]. Odessa: “ARD-LTD” [in Russian].
2. Kurhans'kyj, O.D. & Kotov, B.I. (2016). Analiz sposobiv okholodzhennia zernovoho materialu [The analysis of the grain material cooling ways]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK – Engineering, Energy, Transport AIC*, 2(94), 49– 52 [in Ukrainian].
3. Kotov, B.I., Kalinichenko, R.A. & Kurhans'kyj, O.D. (2017). Teplo i masoobmin pry sushinni i okholodzhenni zernovoho materialu u schil'nomu rukhomomu shari [Heat and mass transfer in drying and cooling]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK – Engineering, Energy, Transport AIC*, 1, 93–95 [in Ukrainian].
4. Kotov, B.I., Kalinichenko, R.A., Kurhanskyj, O.D., Stepanenko, S.P. & Shvydia, V.O.. (2016). Teoretychni doslidzhennia protsesu okholodzhennia zernovoho materialu pry peremischenni u vibrovodtsentrovomu shari [Theoretical research the cooling process of grain material when moving in

- layer vibrocentrifugal]. *Konstruivannja, vyrobnyctvo ta ekspluatacija sil's'kohospodars'kyx mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery*, Vol. 46, 54-60 [in Ukrainian].
5. Kalinichenko, R.A. & Kotov, B.I. (2018). Matematyčne modeliuвання stacionarnykh rezhymiv ustanovok dlja okholodzhennia i nahryvu dyspersnykh sil's'kohospodars'kykh materialiv [Mathematical modeling of stationary modes of installations for cooling and heating of dispersed agricultural materials]. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia sil's'koho hospodarstva – Mechanization and electrification of agriculture*, Vol. 8, 97–104 [in Ukrainian].
  6. B.I. Kotov, R.A. Kalinichenko, A.V. Rud', S.M. Hrushets'kyj (2021). Vyznachennia shliakhiv pidvyschennia efektyvnosti okholodzhennia zerna pislia susharok i termoobrobok [Increase the efficiency of grain cooling after drying and heat treatment]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK – Engineering, Energy, Transport AIC*, 2(13), 111–120 [in Ukrainian].
  7. Altuhova, T.A. & Shuhanov, S.N. (2013). Jeksperimental'nye issledovaniia raboty vihrevogo ohladitelja zerna s pomoshh'ju polnofaktornogo jeksperimenta [Experimental studies of the operation of a vortex grain cooler using a full-factorial experiment]. *Vestnik AltGAU – Bulletin of AltSPU*, 9, 99–102 [in Russian].
  8. Stankevich, G.N., Petrunja, V.N. (2003). Tehnika i tehnologija ispol'zovaniia iskusstvenno ohlazhdennogo vozduha v processe hraneniia zerna [Technique and technology for the use of artificially cooled air during grain storage]. *Hranenie i pererabotka zerna – Storage and processing of grain*, 3, 52–53 [in Russian].
  9. Hryshchenko, V.O. & Kotov, B.I. (2016). Matematyčne modeliuвання i rozrakhunok dynamichnykh rezhymiv povitrookholodzhuvacha dlja okholodzhennia zerna ta zberihannia [Mathematical modeling and calculation of air coolers dynamic mode cooling grain storage]. *Naukovyj visnyk Natsional'noho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Serii: Tekhnika ta enerhetyka APK – Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: Engineering and Energy AIC*, Vol. 252, 108–114 [in Ukrainian].
  10. Chajchenec, N.S. (1989). Optimal'noe proektirovanie teplonasosnykh sushil'nykh ustanovok [Optimal design of heat pump dryers]. *Holodil'naja tehnika – Refrigeration technology*, 2, 46–50. [in Russian].
  11. Kotov, B.I., Kalinichenko, R.A. & Lipunov, M.I. (2012). Analityčne vyznachennia dynamichnykh teplovolohisnykh rezhymiv zernosusharok bezpererвної dii [Analytical dependences for determining the parameters of the drying process at the output of grain dryers]. *Konstruiivannia, vyrobnyctvo ta ekspluatatsiia sil's'kohospodars'kykh mashyn: zahal'noderzh. mizhvid. nauk.-tehn. zb. – Design, manufacture and operation of agricultural machinery*, Vol. 42, part. 2, 17–23 [in Ukrainian].
  12. Amerhanov, R.A. (2003). *Optimizacija sel'skohozjajstvennykh jenergeticheskikh ustanovok s ispol'zovaniem vozobnovljaemykh vidov jenerгии [Optimization of agricultural power plants using renewable energy]*. Moskva: Kolos [in Russian].
  13. Nikul'shyn, V.R. & Vysochyn, V.V. (2014). *Teplovi nasosy ta kondytsionery [Heat pumps and air conditioners]*. O. : Media Art [in Ukrainian].
  14. Hoshtarija, A.G. (1973). Razrabotka i jeksperimental'noe izuchenie processa teplonasosnogo teplosnabzhenija chaefiksacionnykh i chaesushil'nykh agregatov i teplotekhnicheskoe issledovanie nizkotemperaturnogo hraneniia chajnogo lista [Development and experimental study of the process of heat pump heat supply of tea-fixing and tea-drying units and thermotechnical study of low-temperature storage of tea leaves] : *Extended abstract of candidate's thesis*. Gruz. politehn. in-t. Tb. [in Russian].

**Boris Kotov**, Prof., DSc.

*Podilsky State Agrarian and Technical University (PDATU), Kamyanets-Podilsky, Ukraine*

**Roman Kalinichenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Separated subdivision of NUBiP of Ukraine «Nizhin Agrotechnical Institute», Nizhin, Ukraine*

**Yuri Pantsir**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*State Agrarian and Engineering University in Podilya, Kamyanets-Podilsky, Ukraine*

**Igor Gerasimchuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*State Agrarian and Engineering University in Podilya, Kamyanets-Podilsky, Ukraine*

**Volodymyr Hryshchenko**, PhD tech. sci.

*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine*

## **Mathematical Model of Heat Pump Cooling System of Material After Drying and Heat Treatment**

The article considers the issue of increasing the efficiency of coolers of the material heated during drying by using a heat pump unit to produce artificial cold. The scheme of use of a thermal pump in a complex with the drying installation and the portable cooler of material is offered. A mathematical description of the stationary modes of operation of the drying unit, material cooler and heat pump elements on the basis of a steam

compressor refrigeration unit is formulated. At creation of physical and mathematical models of heat and mass transfer in the course of drying and cooling of material (grain) the following conditions are accepted simplifying the mathematical description, but without changing real process: moisture from the material is removed according to Dalton's evaporation law, while the moisture in the material evaporates and is removed simultaneously; moisture content and temperature in the volume of the material are evenly distributed, heat and mass transfer occurs only between the surface of the material and the drying agent; the effects of radiation and contact heat transfer are taken into account by heat transfer coefficients; stationary fields of temperature and moisture content are assumed to be one-dimensional, which vary according to the coordinate calculated in the direction of movement of the material; when cooling the moisture removal material is not taken into account for low residual moisture; the size of the surface of the material in the process of drying and cooling does not change; the heat exchange equipment of the heat pump is an object with concentrated parameters. Using the obtained mathematical dependences, graphical dependences of changes in grain and air temperature are constructed, which allow to evaluate the expediency of using a heat pump.

The formulated mathematical model of stationary modes of the heat pump drying unit with artificial cooling of the dried material can be used to evaluate the feasibility and energy efficiency of the used refrigeration machines for grain cooling, especially after high-temperature processing. The obtained analytical dependences in the form of a closed system of equations can be used to optimize the parameters of the heat pump drying unit by the criterion of minimizing energy consumption.

**drying unit, material cooler, heat pump, compressor, condenser, air cooler**

*Одержано (Received) 16.10.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 24.10.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021*

УДК 631.674.6:631.559

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.14-20>

**К.В. Васильковська**, доц., канд. техн. наук, **М.М. Ковальов**, канд. с.-г. наук,  
**О.О. Андрієнко**, доц., канд. с.-г. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький,  
Україна*

*e-mail: vasilkovskakv@ukr.net*

## Технічне забезпечення ін'єкційного зрошення овочевих культур

В статті запропоновано схему краплинного зрошення ін'єкційного типу для вирощування овочевих культур на присадибній ділянці. В запропонованій конструкції для краплинного зрошення розраховано схему та необхідну кількість розміщення трубок з крапельницями та мікротрубок із кілочками для подачі води в підґрунтовий простір кореневої системи рослин. На ділянці під овочеві культури використано ємність для фертигації – введення рідини в зрошувальну систему для підживлення рослин, задля захисту їх від стресів, покращення розвитку та збільшення врожайності. Проведена серія досліджень із забезпечення вологою ділянки у зоні формування коренів і збереження повітрообміну ґрунту та їх впливу на врожайність томатів. Використання краплинного зрошення ін'єкційного типу дало змогу збільшити врожайність до 40% та при цьому економно витратити воду.

**зміна кліматичних умов, краплинне зрошення, ін'єкційний тип, мікротрубка, коренева система**

**Постановка проблеми.** Зі зміною кліматичних умов, як в Україні, так і в Світі, постає необхідність забезпечення рослин овочевих культур світлом, повітрям та водою в повному обсязі, тому використання ін'єкційного краплинного зрошення для